

|||||||
 論 文
 |||||

태양열 난방 시스템에 적용되는 축열조의 성층화에 관한 연구

홍 희 기* 김 효 경**

A Study on Thermally Stratified Hot Water Storage Tank in A Solar Heating System

Hi Ki Hong* Hyo Kyung Kim**

ABSTRACT

An experiment on the devices that enhance the stratification of storage tanks in a solar heating system has been carried out.

The benefits of thermal stratification in sensible heat storage are to increase the system performance such as the collector efficiency or the fraction of the total load supplied by solar energy.

Using the diffuser and the distributor as the stratification enhancement device, the experiments were performed in the different condition of diameter and material of the distributor.

As a result of experiments, there exists the diameter of distributor in which the stratification is made maximum under certain design and operation condition.

Also it was identified that the kind of distributor material influenced the degree of stratification.

Comparing the experimental result to the computational results calculated under the same conditions, the node number N(stratification index) was determined.

The results of computer simulation that was performed about the actual solar heating system in Seoul for 24 hours show the relative advantage of stratified over well-mixed storage and the significant improvements in system performance.

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정희원, 서울대학교 공과대학

기 호 설 명

A_c	집열기 유효면적
A_f	축열조 단면적
D	축열조 지름
D_i, D_o	집열기내 소관의 내·외경
d	분배기 직경
F	핀효율 계수
F_s	태양열 의존도
h_w	집열기 표면의 열전달계수
H	축열조의 높이
I	수평면 일사량
I_b, I_d	수평면 직달·산란 일사량
\dot{m}_c	집열기측 순환유량
\dot{m}_L	부하측 순환유량
N	절점수(성층화지표)
N_g	덜개유리수
Q_u	집열량
Q_{loss}	실내에서 외부로 손실되는 열량
Q_{load}	축열조에서 실내로 공급하는 열량
Q_{house}	실내를 난방하는데 필요한 실제열량
$q_{coll, i}$	집열기로부터의 열유입량
$q_{load, i}$	부하로부터의 열유입량
$q_{c, i}$	축열조내 전체유동에 의한 열전달량
$q_{k, i}, q_{e, i}$	절점 i로의 열전도량 및 외부열손실량
T_a, T'_a	외부 및 실내의 공기온도
T_{as}, T'_a	열교환기 출구·입구의 공기온도
T_{limit}	순환펌프 작동한계온도
T_{min}	축열조내 물의 초기온도
$T_{c, i}, T_{c, o}$	집열기 입·출구온도
T_s, i	절점 i의 온도
$T_{f, m}, T_{p, m}$	집열매 및 집열판 평균온도
U	축열조 벽의 열손실계수
U_t, U_e, U_b	집열기 앞, 옆, 뒷면의 열손실계수
$(UA)_{house}$	실내의 열손실계수와 표면적의 상당적
$(UA)_{st}$	축열조의 열손실계수와 표면적의 상당적
V_w	외기풍속
X	축열조 상부로부터의 거리 그리스 문자

α	집열관의 흡수율
β, γ	집열기 경사각, 표면방위각
δ	적 위
ϵ_g, ϵ_p	덜개유리, 집열판 방사율
θ	입사각
ρ	지표면 반사율
$(\tau\alpha)_{ave}$	투과율과 흡수율의 평균 상당적
ϕ	위 도
ω	시간각

1. 서 론

물을 축열매 및 집열매로 사용하는 태양열 시스템에서 축열조 내부를 성층화시킴으로써 집열 효율을 증가시킬 수 있고, 가용에너지면에서도 성층화가 이루어지지 않은 상태와 비교하여 유리하다.(1,2,3) 태양열 난방시스템은 집열기측 순환유량이 급탕전용 시스템에 비하여 전반적으로 증가하며 성층화 촉진기구(baffle, diffuser, distributor)을 사용하지 않는 경우 집열기측, 부하측으로부터 유입하는 유동의 교란 등으로 성층화를 유지하기 곤란하다.(2,4)

축열조 내부가 완전 혼합되어 있는것으로 가정한 상태로 태양열 시스템을 시뮬레이션한 경우도 있으나 성층화 촉진기구를 사용하여 축열조 내부를 성층화시킨 상태에 적용하면 잘 일치하지 않는다. 1차원 해석적 모델은 축열조 내부를 1차원이라 가정하고, N개의 절점으로 나누며 각각의 절점 내부는 완전혼합상태로 본것인데 최근의 태양열 시스템의 시뮬레이션에 많이 사용되고 있다.(1.2) 이때 N이 1인 경우는 완전혼합 모델과 일치하게 된다.

이상적인 성층화는 가열된 집열기 출구의 물이 축열조 내의 같은 온도부위로 정확하게 유입할때 이루어지며 부분성층화는 집열기 출구온도가 축열조 상부의 고온부보다 높은 경우에는 이상적인 성층화와 같으나, 낮은 경우에는 같은 온

도부위에서부터 축열조 상부의 고온부가 완전혼합되는 것이다. 이상적인 성층화는 N이 무한대 일때이다.

따라서 실제의 축열조는 성층화 정도에 따라 1~ ∞ 사이의 N을 갖게되며, 이 N이 성층화 정도를 나타내는 지표가 된다. 실제의 태양열 시스템의 축열조는 설계조건, 작동조건에 따라 고유의 성층화지표 N를 갖게되며 실험으로부터 구할 수 있다. 축열조 내부를 3차원적으로 해석한 모델도 있으며 보다 정확한 결과를 얻을수는 있으나 계산량이 방대해서 태양열 시스템에는 적용이 곤란하다. 일반적으로 1차원 모델은 계산량도 많지 않으며, 실제의 시스템과 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.(2) 본 논문에서는 축열조 내부의 성층화를 촉진시킬수 있는 기구에 대해서 다양한 실험을 하여 최적의 설계조건을 찾아내고, 그때의 성층화지표 N을 구하며, 이러한 기구를 사용한 태양열 난방시스템에 대하여 24 시간 동안의 컴퓨터 시뮬레이션을 하여 어느 정도의 집열효율을 향상시킬 수 있고 어느 정도의 가용성을 높일수 있는지에 대하여 알아본다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1. 실험장치

축열조내의 온도성층화 정도를 알아보기 위하여 Fig.1과 같은 실험장치를 제작하였다.

축열조 내부구조는 Fig.2에 제원은 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Specification of Storage Tank

재 질	Acryl
직경×높이	0.388 × 0.8 (m)
유효용량 (UA)st	82.8 Liter 1.423 (W/°C)

축열조내의 성층화 촉진기구는 확산기(di-

ffuser) 및 분배기(distributor)을 사용하였다. 분배기는 아크릴관에 구멍을 뚫은 형태와 나일론 천을 감은 형태의 2가지 종류를 실험에 사용하였다.

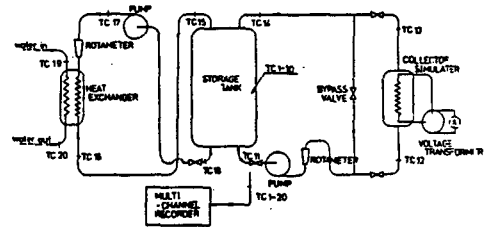


Fig. 1 Schematic diagram of experiment System.

No	Name of Elements	No	Name of Elements
1	frame of storage tank	6	load-side distributor
2	styrotoam cover	7	collector-side diffuser
3	flnsge	8	outlet of collector-side
4	cover of storage tank	9	load-side diffuser
5	collector-side distributor	10	fnlet of load-side

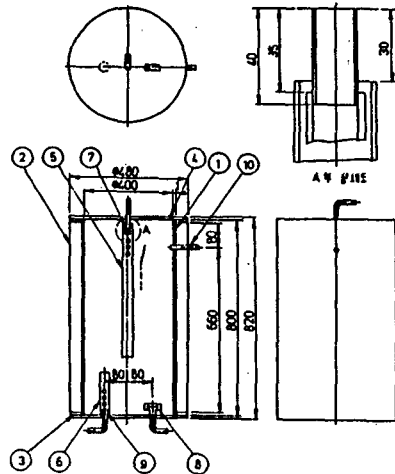


Fig.2 Detailed diagram of storage tank.

2-2. 실험방법

다음과 같은 순서로 실험을 한다.

- a. 축열조에 물을 채운후 온도가 균일해 지도록 한다.
- b. Collector simulator 입출구 온도차가 10 °C정도 되도록 유량 및 전압을 조절한다.
- c. 실험장치를 작동시키고 데이터를 출력한다.
- d. 축열조내의 물의 1/2이 순환되면 전원을 차단하고 by-pass 를 통해 계속 순환시킨다.
- e. 축열조내의 물이 한번 완전히 순환하면 실험을 마친다.

3. 태양열 난방시스템 이론

3-1. 축열조 성층화 모델 (1), (2)

축열조내의 성층화에 대한 1차원 해석적모델로 CSU모델을 사용했으며 개략도를 Fig.3 에 에너지 관계를 Fig.4에 표시한다.

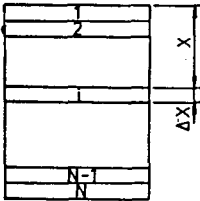


Fig.3 Schematic Diagram of Storage Tank Used in CSU Model.

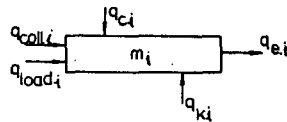


Fig.4 Energy Balance for i-th Node.

Fig.4와 같은 절점 i 에 대한 에너지 평형식은

$$m_i C_p \frac{dT_{s,i}}{dt} = q_{c,i} + q_{coll,i} + q_{load,i} + q_{k,i} - q_{e,i} \quad (1)$$

와 같다.

식 (1)에서 우변의 각 항은 다음과 같다.

$$q_{c,i} = \begin{cases} C_p \dot{m}_{m,i} (T_{s,i-1} - T_{s,i}) & \text{if } \dot{m}_{m,i} > 0 \\ C_p \dot{m}_{m,i+1} (T_{s,i} - T_{s,i+1}) & \text{if } \dot{m}_{m,i+1} < 0 \end{cases} \quad (1a)$$

$$q_{coll,i} = F_i \dot{m}_c C_p (T_{c,o} - T_{s,i}) \quad (1b)$$

$$q_{load,i} = F_i \dot{m}_L C_p (T_{L,r} - T_{s,i}) \quad (1c)$$

$$q_{k,i} = k_f A_f [(T_{s,i} - T_{s,i+1}) / \Delta X + (T_{s,i} - T_{s,i-1}) / \Delta X] \quad (1d)$$

$$q_{e,i} = U S_i (T_{s,i} - T_a) \quad (1e)$$

3-2. 일사량 관계이론

수평면에 대한 직달 일사량과 산란 일사량으로부터 지표면에서 경사진 집열판에 투사되는 전 일사량은 다음식으로 계산할 수 있다.^{(1),(6)}

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2)$$

여기에서 R_b 는 다음 식으로 정의된다.

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi}$$

집열판에 흡수되는 일사량은

$$S = (\tau \alpha)_{ave} I_T \quad (3)$$

로 구할 수 있다.

3-3. 평판형 집열기 관계이론 (1)

집열기 앞면의 열손실 계수 U_i 는 다음식으로 구한다.

$$U_i = \left(\frac{N_g}{\left[\frac{C}{T_{p,m}} \left(\frac{T_{p,m} - T_a}{N_g + f} \right) \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right)^{-1} + \frac{\sigma(T_{p,m} + T_a)(T_{p,m}^2 + T_a^2)}{(\epsilon_p + 0.0059 N_g h_w)^{-1} + \frac{(2N_g + f - 1 + 0.133 \epsilon_p)}{\epsilon_g}} N_g$$

집열기 전체에 대한 열손실계수는 다음과 같다.

$$U_L = U_i + U_b + U_e \frac{A_{edge}}{A_c} \quad (5)$$

집열기의 특성을 나타내는 집열기 효율계수 F' , 열제거계수 F_R 유동계수 F'' 는 다음과 같다.

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L(D_o + (W-D_o)F)} + \frac{1}{C_b} + D_i h_{f,i} \right]} \quad (6)$$

$$F_R = \frac{\dot{m}_c C_p}{A_c U_L} [1 - \exp(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}_c C_p})] \quad (7)$$

$$F'' = \frac{\dot{m}_c C_p}{A_c U_L \cdot F'} [1 - \exp(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}_c C_p})] \quad (8)$$

집열판 평균온도 $T_{p,m}$ 은 다음과 같다.

$$T_{p,m} = T_{c,i} + \frac{Q_u/A_c}{U_L F_R} (1 - F_R) \quad (9)$$

집열판에서 실제로 얻을 수 있는 열량 Q_u 는 다음과 같다.

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{c,i} - T_a)] \quad (10)$$

식 (10)에서 획득열량 Q_u 에 영향을 주는 인자로는 A_c, S, T_a 가 고정된 경우 $F_R, T_{c,i}$ 와 U_L 이다. 이 중 열제거계수 F_R 은 집열기 순환유량 \dot{m}_c 가 커질수록 증가하나 축열조 내의 성층화 유지가 곤란해진다. 따라서 집열기 입구온도 $T_{c,i}$ 가 증가하게 되며 주위로의 열손실이 커져 실제 획득열량을 감소한다. 그러나 성층화 축진기구를 사용함으로써 어느정도 집열기 순환유량이 커져도 축열조내의 성층화를 유지하여 열제거계수 F_R 을 크게, 집열기 입구온도 $T_{c,i}$ 를 낮출수 있다. 따라서 축열조내의 성층화가 잘 이루어질수록 태양열시스템의 집열효율은 증가하게 된다.

그리고 식(10)에서 열제거계수 F_R 은 온도의 변화에 따라 상당히 달라지므로 반복해법에 의하여 전체계산을 수행한다. 집열효율 η 는 다음 식으로 정의된다.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I_T} \quad (11)$$

3-4. 태양열 의존도 (1)

태양열 시스템에서 태양열 의존도 F_s 는 다음 식으로 정의된다.

$$F_s = \frac{\text{energy supplied by solar system}}{\text{energy needed for load}} \quad (12)$$

같은 집열효율의 시스템에서도 이 F_s 가 크면 가용도가 높다고 할 수 있다. 그러나 태양열 의존도가 커지면 설비용량이 증가하며 경제성 분석에 의해서 적합한 F_s 가 결정된다.

3-5. 설계조건

계산대상의 태양열 난방시스템은 Fig.1의 실험장치와 거의 같으나 collector simulator 대신에 실제의 집열기를, 부하측 열교환기에 열회득 작동유체를 물 대신 공기를 사용한다.

각 부위의 설계조건을 Table 2에 나타낸다.

Table 2 System Parameters for Simulation

STORAGE TANK	VOLUME	82.7 LITRE
	H/D	1.80
	(UA) _{st}	0.12 W/°C
	INITIAL TANK TEMPERATURE	63°C
COLLECTOR	AMBIENT TEMPERATURE AROUND TANK	21°C
	AREA	1.5m ²
	ANGLE WITH HORIZONTAL (τ α) ave	50°
	F'	0.85
LOAD	SURFACE AZIMUTH ANGLE	0
	(UA) _{load}	2.0 W/°C
	ROOM TEMPERATURE	21°C
	HEAT EXCHANGER EFFECTIVENESS	0.42
	C _{air} (= (ṁc) _{air})	3.0

실내에서 외부로 손실되는 열량 Q_{loss} 는 다음과 같다.

$$Q_{loss} = (UA)_{house} (T'_a - T_a) \quad (13)$$

축열조에서 실내로 공급하는 열량 Q_{load}

$$Q_{load} = (\dot{m}C)_{air} (T_{as} - T'_a) \quad (14)$$

환기를 고려하여 외부공기를 25% 추가하면 실제공급열량 Q_{house} 는

$$Q_{house} = (\dot{m}C)_{air} (T_{as} - T''_a) \quad (15)$$

여기에서 $T''_a = 0.75 T'_a + 0.25 T_a$

축열조에서 공급할 수 있는 열량 Q_{load} 가 실내에서 외부로 손실되는 열량 Q_{loss} 보다 작으면 축열

조 순환펌프의 작동을 중단하고 보조열원을 가동하며 식 (13),(14)로 부터 보조열원의 작동판정 기준은 다음과 같다.

$$T_{as} < T_{limit} \tag{16}$$

$$T_{limit} = T'_a + \frac{(UA)_{house}}{(\dot{m}C)_{air}} (T'_a - T_a)$$

3-6. 계산방법

식 (1)의 N개의 미분방정식을 풀어 축열조 내부의 시간에 따른 온도변화 및 에너지관계를 계산하는 과정을 Fig.5의 흐름도에 보인다.

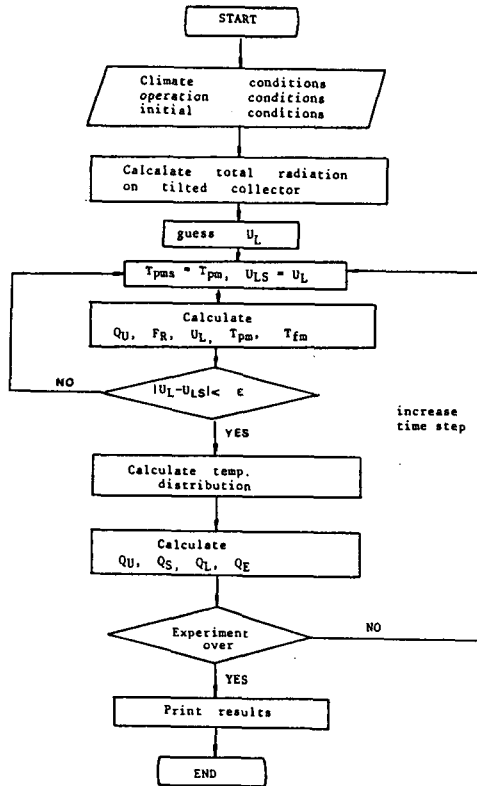


Fig.5 Flow Chart

4. 실험결과 및 검토

4-1. 실험데이터의 무차원화

a. 축열조의 높이의 지름에 대한 비 H/D 를

축열조 형상계수라 부르며 S 로 표시한다.

b. 축열조의 용량에 대한 집열기측 순환유량의 비 V_{st}/\dot{V}_c 를 축열조 특성시간이라 부르며, τ_c 로 표시한다.

실험경과시간은 τ/τ_c 로 무차원화하여 τ^* 로 나타낸다.

c. 분배기 지름에 대한 축열조 지름의 비 d/D 를 d^* 로 표시하며, 분배기 전체면적에 대한 구멍의 면적비를 f 로 표시한다.

d. 축열조 상부의 물표면에서부터의 거리는 X/H 로, X^* 로 표시한다.

e. 축열조내 온도는 $(T - T_{min})/(T_c - T_{min})$ 으로 무차원화하여 T^* 로 표시한다.

4-2. 성층화에 영향을 미치는 인자

본 논문에서는 다음과 같은 인자를 고려한다. (6)

- a. 성층화 촉진기구의 사용유무
- b. 분배기의 d^*, f 의 변화
- c. 분배기의 재질 - 아크릴관, 나일론천
- d. 축열조 형상계수

4-3. 실험결과 및 검토

4-3-1. 성층화 촉진기구의 사용유무에 의한 영향

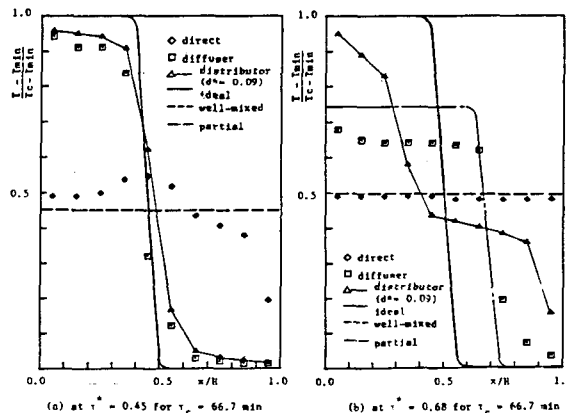


Fig.6 Temperature distribution in a storage tank (by use or not of stratification enhancement device)

성층화 촉진기구를 전혀 사용하지 않은 상태와 분배기, 확산기를 사용한 상태의 성층화 정도를 비교한 것을 축열조 특성시간 66.7분에 대해서 Fig.6에 나타낸다.

$\tau^* > 0.5$ 에 대해서 특히 분배기의 효과가 성층화 유지에 현저함을 보인다.

4-3-2. 분배기 설계조건에 의한 영향

• 아크릴 분배기의 d^* 를 변화시킨 것에 의한 영향은 Fig.7에 나타낸다. 성층화를 가장 잘 유지하는 최적의 d^* 가 존재함을 알 수 있다.

• 아크릴 분배기의 f 를 변화시킨 것에 의한 영향은 Fig.9에 나타낸다. 지배적인 영향을 주는 인자는 아닌 것으로 판단된다.

Fig.7 Temperature distribution in a storage tank (by variation of d^*) using rigid distributor

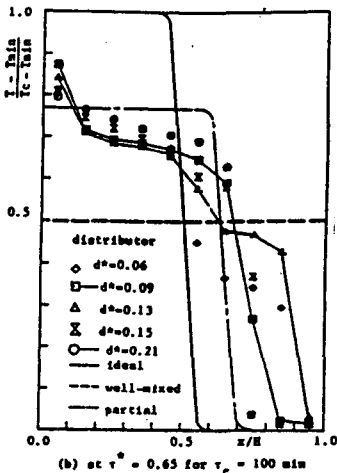
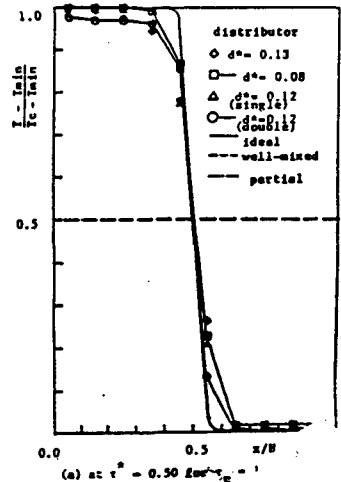
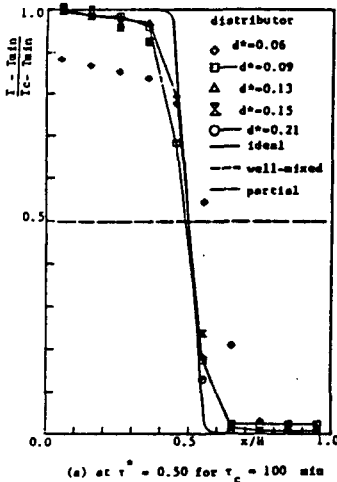
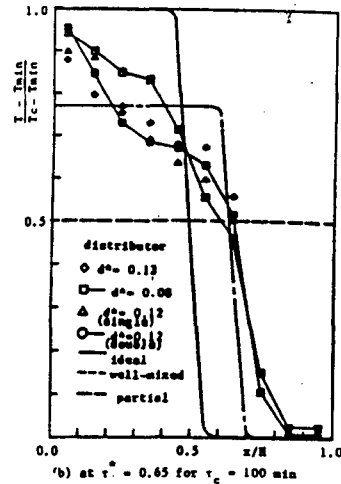


Fig.8 Temperature distribution in a storage tank (by variation of d^*) using flexible distributor.

• 아크릴 분배기의 각 축열조의 특성시간에 대한 최적의 d^* 를 Table 2에 표시한다.

Table 2. Optimal diameter for τ_c (rigid distributor)

τ_c	100 min	66.7 min	50 min
d^*	0.09	0.13	0.15

분배기의 재질을 나일론 천으로 한 경우에도 아크릴과 유사한 결과를 얻었으나 보다 우수한 성층화 유지능력을 보였다. 이는 천의 경우, 그 단면이 신축성을 갖고 있으므로 같은 온도 또는 같은 압력범위에서는 단면적이 증가함으로써 즉 압력평형을 이룸으로써 축열조 내의 다른 온도 범위로 잘못 유입되는 것을 줄일 수 있었기 때문이라고 생각된다.

나일론천의 d^* 를 변화시킨 것에 의한 영향을 Fig.8에 나타낸다. 축열조 특성시간에 대한 최적의 d^* 를 Table 3에 표시한다.

Table 3 . Optimal diameter for τ_c (flexible-distributor)

τ_c	100 min	66.7 min	50 min
d^*	0.08	0.12	0.12

4-3-3. 축열조 형상계수에 의한 영향

축열조 형상계수 1.08 과 1.80 에 대한 결과를 Fig.10에 표시한다.

태양열 난방시스템에서 많이 사용되는 축열조 형상계수는 성층화에 영향을 지배적으로 미치는 인자가 아님을 알 수 있다.

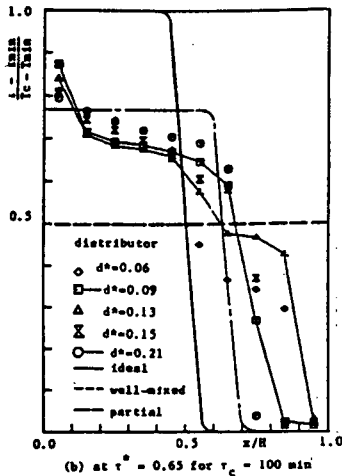


Fig.9 Temperature distribution in a storage tank (by variation of f) using rigid distributor $d^* = 0.12$

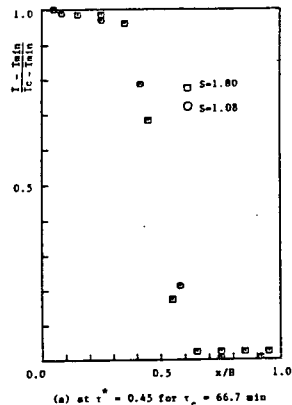
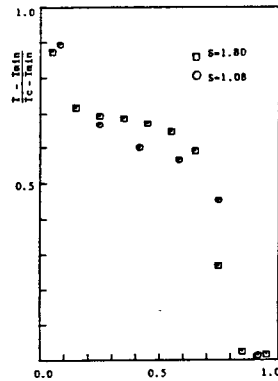


Fig.10 Temperature distribution in a storage tank (by variation of aspect ratio H/D) using rigid distributor $d^* = 0.09$

5. 계산결과 및 검토

5-1. 실험조건에 대한 계산결과

4 장에서의 실험과 같은 조건의 초기조건과 작동조건으로 실험을 하였다. 절점수 N 을 변화시켜가면서 계산한 결과와 천으로 만든 분배기 중 성층화 유지정도가 가장 좋은 것을 비교하였으며 그 결과를 Table 4에 보인다.

Table 4 .

τ_c	100 min	66.7 min	50 min
N	15	10	8

5-2. 실제기상자료를 사용한 계산결과

24 시간 동안의 매 시각별 기상자료를 사용하여 태양열 난방시스템을 시뮬레이션하였다. 한 예로서 집열기측 순환유량 $5.3 \ell / \text{min} \cdot \text{m}^2$ of collector area에 대한 것을 Fig.12, Fig.13에 보인다. 이 경우에 N 이 10 ~ 15 정도의 성층화를 유지하면 집열효율, 태양열 의존도를 저하시키지 않고, 더 이상의 성층화를 잘 이룰 필요는 없으며 충분하다.

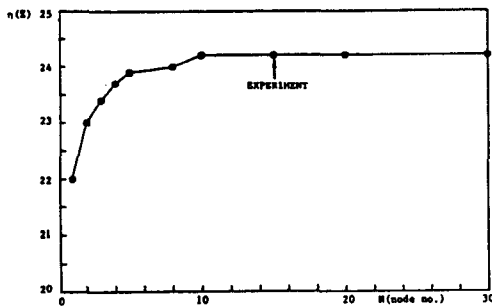


Fig.12 Efficiency of collection vs number of stratified segments N (collector-side flow rate = $5.3 \ell / \text{min} \cdot \text{m}^2$ of collector area)

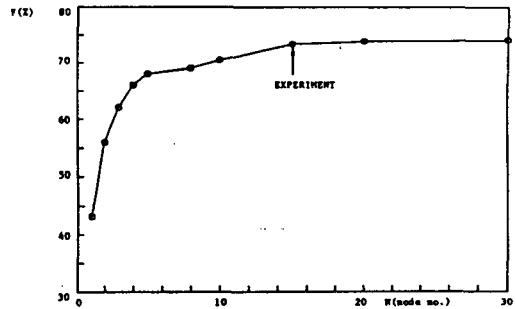


Fig.13 Solar load fraction vs number of stratified tank segments (collector-side flow rate = $5.3 \ell / \text{min} \cdot \text{m}^2$ of collector area)

집열기 순환유량을 변화시켜 가면서 집열효율, 태양열 의존도를 계산하였으며 그 결과를 Fig. 14, Fig.15에 보인다. 최적의 순환유량이 존재함을 보인다. 최적의 순환유량이 존재함을 보인다.

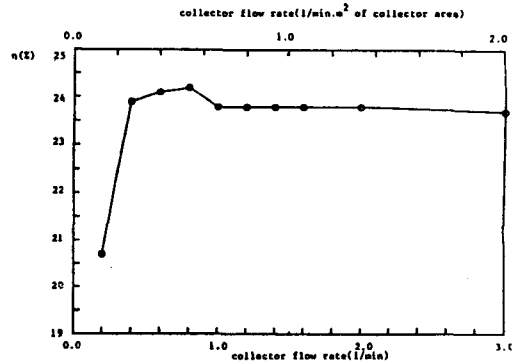


Fig.14 Efficiency of collection vs collector-side flow rate.

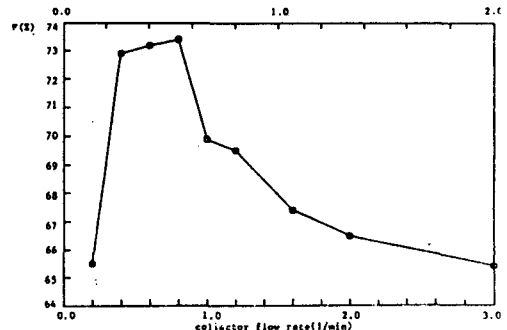


Fig.15 Solar load fraction vs collector-side flow rate.

6. 결 론

태양열 난방시스템의 실험 및 수치계산을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 성층화 촉진기구(확산기, 분배기)를 사용함으로써 축열조 내부의 성층화를 향상시킬 수 있었다.
- 2) 분배기의 설계조건을 바꾸면서 실험한 결과 작동조건에 따라 가장 성층화를 잘 유지할 수 있는 축열조의 직경에 대한 분배기의 직경이 존재함을 알 수 있었다.
- 3) 분배기의 재질을 천으로 하여 단면적의 신축을 가능하게 하면 보다 성층화를 잘 유지할 수 있다.
- 4) 축열조 내부에 성층화 촉진기구를 설치하면 축열조 형상비가 1.0 ~ 2.0 정도의 범위에서는 성층화 유지정도가 축열조 형상비에 거의 영향을 받지 않는다.
- 5) 수치계산 결과 집열기측 순환유량을 증가시키면 집열효율, 태양열 의존도가 증가하나 최대값 이후로는 유량을 증가시켜도 집열효율은 감소하는 경향을 보였다.

인 용 문 헌

1. J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc., 1980.
2. J.K. Kuhn, G.F. von Fuchs and A.P. Zob, "Developing and Upgrading of Solar System Thermal Energy Storage Simulation Models" Boeing Computer Services, Seattle, 1980.
3. M.K. Sharp and R.I. Loehrke, "Stratified Thermal Storage in Residential Solar Energy Applications", J. Energy. Vol. 3, No. 2, 1979.
4. R.I. Loehrke, J.C. Holzer, H.N. Gari an- M.K. Sharp, "Stratification Enhancement in Liquid Thermal Storage Tanks", J. Energy, Vol. 3, No. 3, 1979.
5. S.A. Klein, "Calculation of Flat-Plate Loss Coefficients", Solar Energy Vol. 17, 1975.
6. W.F. Phillips and R.N. Dave, "Effects of Stratification on the Performance of Liquid-Based Solar Heating Systems", Solar Energy, Vol. 29, No. 2, 1982.
7. F.C. McQuiston and J.D. Parker, Heating, Ventilating, and Air Conditioning, John Wiley & Sons, 1982.